Untersuchungen an einem Feldstärke-Meßgerät nach dem Hilfssender-Verfahren

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

genehmigt

von der Philosophischen Fakultät der Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin

Von

Gerhard Schweitzer

aus Berlin

Tag der mündlichen Prüfung: 7. November 1935
Tag der Promotion: 6. Mai 1936

Druck: Doktordruck — Graphisches Institut Paul Funk, Berlin SW 68, Friedrichstr. 231.

84

Referenten: Prof. Dr. A. Wehnelt
Prof. Dr. E. Schumann

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Inhaltsübersicht.

Seite

Einleitung 5

Beschreibung des bisherigen Meßverfahrens und Stellung der Aufgabe 6

Frequenzabhängigkeit des Röhrenvoltmeters am Empfangsrahmen 6

Das Übertragungsverhältnis 9

Bestimmung der induzierten EMK aus der Resonanzspannung 12

Der Dämpfungswiderstand 14

Änderungen an der Apparatur 17

Eichung der Apparatur 19

Ausführung einer Feldstärkenmessung 22

Empfindlichkeit und Genauigkeit des Meßverfahrens 23

Zusammenfassung 24

Tabelle der Zeichen.

R_D = Dämpfender Widerstand
ϑ = Log. Dämpfungsdekrement
h_{eff} = Effektive Antennenhöhe
Z = Entfernung der Rahmen
H = Feldstärke
L_{12} = Gegeninduktivität
E_o = induzierte EMK
R_i = Innerer Röhrenwiderstand der Dämpfungsröhre
ω = Kreisfrequenz
$\Re$ = Resonanzwiderstand des Rahmenkreises
E_2 = Resonanzspannung des Rahmenkreises
C = Resonanzkapazität
L = Selbstinduktion
I_s = Sendestrom
$\ddot{U}$ = Übertragungsverhältnis
n = Windungszahl des Rahmens
F = Windungsfläche des Rahmens
λ = Wellenlänge
t = Zeit
r_1, r_2 = Radien der Rahmen.

Einleitung.

Seit der Einführung der kurzen Wellen von 10 bis 100 m Wellenlänge in die drahtlose Telegraphie hat der Hochfrequenztechniker Interesse an Feldstärkemessungen in diesem Wellenbereich, denn es ist ihm wertvoll, über die Größe und Schwankung der Empfangsintensität einer fernen Station unterrichtet zu sein, um dann Rückschlüsse auf den Bau und Betrieb von Funkstationen machen zu können.

Die Feldstärke wird in Volt pro Meter gemessen; sie ist gleich der in einem Empfangsleiter von 1 m effektiver Antennenhöhe induzierten EMK. Es gilt also für die Feldstärke H

$$(1) \qquad H = \frac{E_0}{h_{eff}}$$

Die durch (1) definierte effektive Höhe einer Antenne steht wohl mit der geometrischen Höhe und Länge der Antenne im Zusammenhang, ist aber weiter von der Form und der Umgebung abhängig und läßt sich direkt nicht exakt bestimmen. Nur die effektive Höhe der Rahmenantenne läßt sich theoretisch herleiten. Sie ist:

$$(2) \qquad h_{eff} = \frac{2\pi n F}{\lambda}$$

Aus diesem Grunde werden genaue Feldstärkemessungen mit Hilfe von Rahmenantennen gemacht oder auf solche zurückgeführt. Zur Kenntnis der Feldstärke ist dann lt. (1) nur die Bestimmung der induzierten EMK E_0 nötig. E_0 steht aber mit der Klemmenspannung E_2 des auf Resonanz abgestimmten Rahmens in einem durch die Dämpfung des Rahmens beeinflußten Zusammenhang. E_2 läßt sich jedoch mit einem Hochfrequenzvoltmeter bestimmen. Für größere Feldstärken sind somit gewöhnliche Röhrenvoltmeter in Audionschaltung durchaus verwendbar, während jedoch die Röhrenvoltmeter mit Vorverstärkung für kleinere Spannungen sich nicht bewährt haben, weil der Verstärkungsfaktor solcher Geräte während des Betriebes infolge Betriebsspannungsänderungen stark schwankt.

Eins der wenigen Verfahren für kleinere Feldstärken, das auf exakten Grundlagen aufgebaut ist und sich auch in der Praxis bewährt hat, ist das von Prof. Leithäuser 1928 im Reichspost-Zentralamt entwickelte Hilfssenderverfahren. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit diesem Verfahren, indem sie es kritisch untersucht, ihm die experimentelle Grundlage gibt und mit Hilfe modernster Mittel verbessert und vereinfacht.

Beschreibung des bisherigen Meßverfahrens und Stellung der Aufgabe.

Das magnetische Feld eines entfernten Senders erzeugt an dem auf Resonanz abgestimmten Meßrahmenkreis eine Klemmenspannung, die von der Feldstärke und effektiven Höhe aber auch von der Dämpfung des Rahmens abhängig ist. Diese Spannung wird durch einen vielstufigen Empfänger verstärkt, um an einem Ausgangs-Indikator-Instrument einen Ausschlag A zu bewirken. Durch einen in der Nähe aufgestellten Sender, dessen Senderahmen induktiv mit dem Empfangsrahmen gekoppelt ist, wird dann an dem Empfangsrahmen eine Resonanzspannung erzeugt, die durch einen zum Empfangsrahmen parallelgeschalteten variablen Widerstand so verkleinert wird, daß am Ausgangsinstrument wieder der Ausschlag A auftritt. Dann ist die vom Meßsender erzeugte, durch den Widerstand reduzierte Klemmenspannung des Rahmens gleich der vom fernen Sender erzeugten. Da diese Hochfrequenzspannung zwischen 10 μV und 100 mV liegt, läßt sie sich nicht direkt messen, und daher wurde sie bisher aus der Gegeninduktivität von Sende- und Empfangsrahmen, Sendestrom, Größe des dämpfenden Widerstandes und der Dämpfung des Empfangsrahmens berechnet. Die Durchführung einer solchen Rechnung erkennt man sofort als ein großes Hemmnis bei den Feldstärkemessungen, wenn man bedenkt, daß für jede Wellenlänge hauptsächlich infolge des bei den hohen Frequenzen sehr beträchtlichen Skineffektes, Selbstinduktion, Widerstand und Dämpfung des Rahmens getrennt zu berechnen sind. Da nicht einmal die Gewähr gegeben war, daß bei den hohen Frequenzen alle Vorgänge den Gesetzmäßigkeiten streng gehorchen, wurde die Aufgabe gestellt, Wege zu finden, die erzeugte Klemmenspannung am Rahmen und seine Dämpfung experimentell zu bestimmen, um so die Feldstärke unter Wegfall jeglicher Rechnung (mit Ausnahme der effektiven Antennenhöhenbestimmung), wenn auch auf Umwegen, nur durch Messungen zu bestimmen.

Frequenzabhängigkeit des Röhrenvoltmeters am Empfangsrahmen.

Als erstes war es deshalb nötig, das Übertragungsverhältnis zwischen Sendestrom i_s und Empfangsrahmenspannung E_2 in Abhängigkeit vom Sendestrom und der Frequenz unter Verwendung größerer Energien zu untersuchen. Die Messung des Sendestromes läßt sich nun mit Hilfe von Thermoinstrumenten leicht und frequenzunabhängig bewerkstelligen, nicht dagegen die Spannungsbestimmung beim Empfänger, dessen Eingangsgegentaktaudion eine ziemlich komplizierte Frequenz- und Belastungsabhängigkeit aufweist. Es war deshalb nötig, die Eingangsstufe auf Richtverstärker umschalt-

bar einzurichten, weil dann die Klemmenspannung des Rahmens direkt an den Gittern der Röhren liegt und sämtliche Kapazitäten und Induktivitäten der Röhren nicht mehr den Rahmenkreis hochfrequent belasten, sondern in die Resonanzabstimmung mit eingehen (s. Abb. 1). Die Belastungsunabhängigkeit kann durch Verwendung

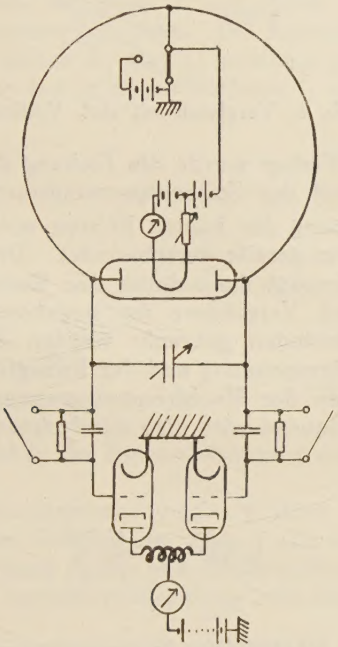

Abb. 1. Schaltbild der Eingangsstufe und der Dämpfungsröhre.

von Röhren mit großem inneren Widerstand und kleinem Durchgriff stets in weitem Maße erreicht werden, weshalb auch als Richtverstärkerröhren Schirmgitterröhren benutzt wurden. Das Gegentaktröhrenvoltmeter in Richtverstärkerschaltung, das der Rechnung nach keine Frequenzabhängigkeit aufweist, konnte nun mit 50periodischem Wechselstrom geeicht werden (Eichschaltung s. Abb. 2). Um die Frequenzabhängigkeit auch experimentell zu bestätigen, wurden Messungen ausgeführt, bei denen das Röhrenvoltmeter in aperiodischer Schaltung mit einem Thermoelement (s. Abb. 3) und in

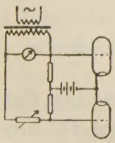

Abb. 2. 50~Eichung.

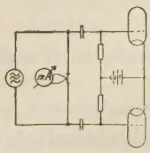

Abb. 3. Vergleich mit Thermoelement.

Resonanz mit einem statischen Voltmeter (Meßbereich 1 bis 20 Volt), dessen Kapazität in die Resonanzabstimmung mit einging (s. Abb. 4),

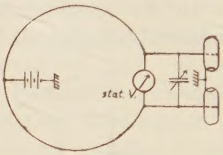

Abb. 4. Vergleich mit stat. Voltmeter.

verglichen wurde. Ferner wurde die Eichung des Röhrenvoltmeters bei Hochfrequenz mit der Spitzenspannungsmethode überprüft:

Die Gitterspannung der beiden Röhren wird so eingestellt, daß der Anodenruhestrom gerade verschwindet. Die auftreffende Hochfrequenzspannung erzeugt dann durch den Richtstrom wieder einen Ausschlag, der durch Vergrößern der negativen Gittervorspannung wieder zum Verschwinden gebracht werden kann. Die Differenz zwischen dieser Gitterspannung und der Ruhegitterspannung ist dann gleich der Amplitude der Hochfrequenzspannung. Die Spannungsmessung bei Hochfrequenz wird also durch dieses Verfahren auf eine

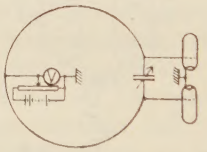

Abb. 5. Schaltbild für Spitzenspannungseichung.

Gleichspannungsmessung zurückgeführt (s. Abb. 5). Wie aus Abb. 6 ersichtlich ist, beträgt die größte Abweichung zwischen den vier Meßmethoden 3,5 %, wobei noch zu bemerken ist, daß wahrschein-

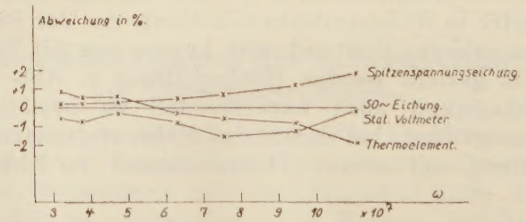

Abb. 6. Vergleich zwischen 4 Meßmethoden.

lich das Thermoelement wegen seiner Ableitungen für das Galvanometer (parallelgeschalteter Hochfrequenzwiderstand) bei kürzeren Wellen den größten Meßfehler aufweist.

Das Übertragungsverhältnis.

Zur Bestimmung der Abhängigkeit der Spannung E_2 am Rahmen vom Strom I_s im aperiodisch angekoppelten Senderahmen und der Frequenz wurden Sender- und Empfängerrahmen in 2 m Abstand voneinander aufgestellt und dann I_s mit einem Thermoelement, E_2 mit dem Röhrenvoltmeter gemessen. Bei konstanter Frequenz war die Abhängigkeit zwischen E_2 und I_s in einem großen Bereich eine lineare (Abb. 7). Erst bei größeren Strömen I_s wurde dieses Gesetz

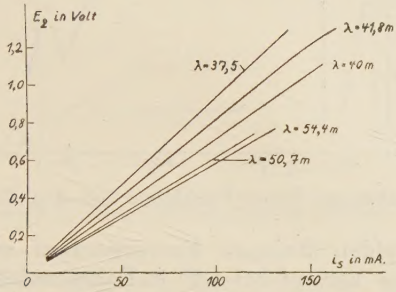

Abb. 7. Abhängigkeit der Resonanzspannung vom Senderstrom.

infolge von Rückwirkungserscheinungen gestört. Die Tatsache der Linearität und daß die Geraden der Abb. 7 alle durch den Nullpunkt gehen, ist die Bestätigung dafür, daß die Beeinflussung zwischen den beiden Rahmen ohne kapazitive Kopplung rein dem Induktionsgesetz:

$$\mathfrak{E}_0 = -L_{12} \frac{d\,\mathfrak{I}_s}{d\,t} \tag{3}$$

gehorcht, denn da λ und somit die Dämpfung des Empfangsrahmens konstant ist, ist E_2 der induzierten EMK E_0 direkt proportional. Dieses äußerst selbstverständlich erscheinende Ergebnis ist die Grundlage zu dem weiter unten angegebenen Feldstärke-Meßverfahren.

Bei Betrachtung der Abbildung 7 bemerkt man, daß sich die Steilheit der Geraden nicht monoton mit der Frequenz ändert. Zur Klärung der Erscheinung wurden Messungen gemacht, bei denen das Strom-Spannungs-Übertragungsverhältnis über den Bereich von $\lambda = 17 - 55$ m in Abhängigkeit von der Frequenz bestimmt wurde. Zur Feststellung der Steilheit der Geraden genügte, da alle Geraden durch Null gehen, jeweils die Messung eines einzigen Punktes. Es ergab sich der Verlauf nach Abb. 8, der vollkommen der Rechnung widerspricht, denn nach dieser wäre, da sowohl L_{12} und somit auch E_0 nach (3) als auch die Dämpfung sich nur nach einer einfachen Funktion verändern können, ein verhältnismäßig glatter Verlauf der

Funktion in Abb. 8 zu erwarten. Der eigenartige Verlauf des Strom-Spannungsverhältnisses ließ vermuten, daß er durch Koppelwellen

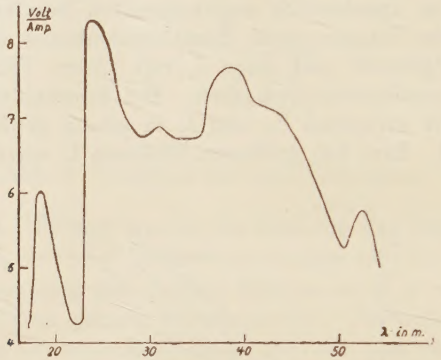

Abb. 8. Spannungs-Strom-Verhältnis bei 2 m Rahmenabstand.

zwischen den beiden Rahmen hervorgerufen wird. Aus diesem Grunde wurde der Verlauf bei 1,50 m Rahmenabstand nochmals aufgenommen (Abb. 8 a). Die starken Verschiedenheiten zwischen den

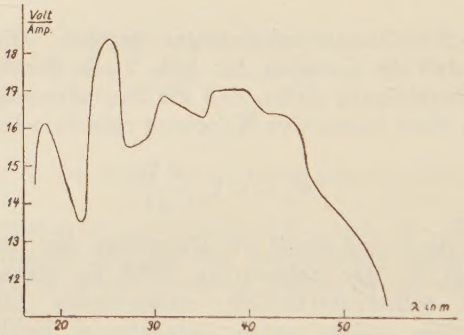

Abb. 8a. Spannungs-Strom-Verhältnis bei 1,5 m Rahmenabstand.

Kurven in Abb. 8 und 8 a lassen sich jedoch nicht als durch einen Bandfiltereffekt hervorgerufen ansehen. Es wurde nunmehr vermutet, daß der Verlauf durch den von den Metallmassen des Meßlaboratoriums hervorgerufene Absorptionen und Reflexionen mit dabei auftretenden Interferenzerscheinungen herrühren könnten. Deshalb wurden die Messungen, die das Übertragungsverhältnis betreffen, im Freien in großer Entfernung von allen Gegenständen wiederholt. Die Kurve I in Abb. 9 zeigt gegenüber den Abbildungen 8 und 8 a einen wesentlich gleichmäßigeren Verlauf, so daß es als bestätigt gelten kann, daß das Übertragungsverhältnis durch in der näheren

Umgebung der Meßapparatur vorhandene Metallgegenstände verfälscht wird. Deshalb hat es auch keinen Sinn, für eine Feldstärkenmeßapparatur das Übertragungsverhältnis in einer Eichkurve festzu-

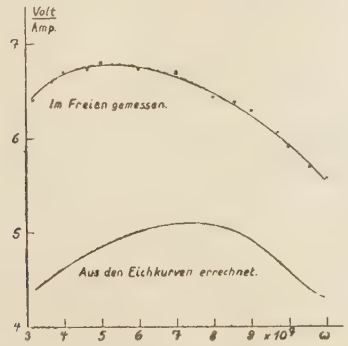

Abb. 9. Das Übertragungsverhältnis.

legen, sondern dieses muß für jede Frequenz und jede Messung zweckmäßig neu bestimmt werden. Die Gegeninduktivität läßt sich nun aber auch aus den geometrischen Abmessungen der beiden Rahmen theoretisch herleiten. Ebenso läßt sich dann an Hand der Eichkurven der Apparatur, wie weiter unten gezeigt wird, das Übertragungsverhältnis berechnen. Es interessiert nun der Vergleich zwischen den berechneten und solchen im Freien gemessenen Werten des Übertragungsverhältnisses. Deshalb soll eine solche Berechnung hier ausgeführt werden, obgleich sie, wie schon oben gesagt, für die Praxis keinen Wert hat. Es ist:

(4) $$L_{12} = \int\int \frac{ds_1 \cdot ds_2 \cdot \cos\varphi}{|r_{12}|} \quad *)$$

wobei φ der Winkel zwischen zwei beliebigen Leiterelementen der beiden Rahmen und r_{12} der Verbindungsvektor zwischen zwei solchen ist.

$$L_{12} = \int ds_2 \int \frac{r_1 \cos\varphi}{|r_{12}|} \, d\varphi$$

$$L_{12} = 2\pi r_2 \cdot r_1 \int \frac{\cos\varphi \; d\varphi}{\sqrt{Z^2 + r_1^2 + r_2^2 - Z r_1 r_2 \cos\varphi}}$$

r_1 und r_2 sind die Radien der beiden Rahmen und z der Abstand zwischen den beiden Rahmenebenen.

*) Alle Integrale sind über den Kreis zu erstrecken.

Es gilt nun für unsere Meßanordnung $z^2 \gg r_1^2 + r_2^2$. Dann ist, wenn die Wurzel in eine Reihe entwickelt wird:

$$L_{12} = \frac{2\pi r_1 r_2}{Z} \int \cos\varphi \left(1 + \frac{r_1 r_2}{Z^2} \cos\varphi\right) d\varphi$$

$$L_{12} = \frac{2\pi r_1^2 r_2^2}{Z^3} \int \cos^2\varphi \, d\varphi = \frac{2\pi^2 r_1^2 r_2^2}{Z^3} \tag{5}$$

Setzt man in diese Gleichung die Werte der Meßanordnung ein ($r_1 = 20$ cm, $r_2 = 40$ cm, $z = 200$ cm), so ergibt sich

$$L_{12} = 1{,}6 \text{ cm} = 1{,}6 \cdot 10^{-9} \text{ Hy}.$$

Nun ist lt. (3) $\mathfrak{E}_0 = -L_{12} \frac{d\mathfrak{J}_s}{dt}$. Für sinusförmigen Sendestrom erhält man dann den Effektivwert

$$E_0 = L_{12} \omega I_s. \tag{6}$$

Wie weiter unten gezeigt wird, ist:

$$E_2 = E_0 \omega C \mathfrak{R}. \text{ Also:} \tag{16}$$

$$\underline{E_2 = L_{12} \omega^2 I_s C \cdot \mathfrak{R}}. \tag{7}$$

Die hieraus errechneten Übertragungsverhältnisse sind in der Größenordnung der gemessenen und in Abb. 9 in der Kurve II eingetragen. Bemerkenswert ist, daß die gemessenen Werte sämtlich größer sind als die berechneten (20 bis 40 %), was darin seinen Grund haben dürfte, daß die Zuleitungen die Rahmen zu Sender und Empfänger zusätzlich induzieren, in der Rechnung aber nicht mit erfaßt worden sind.

Bestimmung der induzierten EMK aus der Resonanzspannung.

Wie schon oben erwähnt, ist zur Bestimmung der induzierten EMK E_0 aus E_2 die Kenntnis der Dämpfung des Rahmenkreises erforderlich. Zur Erläuterung betrachten wir die Gleichung eines Schwingungskreises, in dem eine EMK E_0 induziert wird. Es ist:

$$I = \frac{E_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \tag{8}$$

Da E_0 konstant ist, hat I ein Maximum, wenn

$$\omega^2 CL = 1 \text{ ist.} \tag{9}$$

Die Spannung E_2 am Kondensator, die mit Hilfe eines Röhrenvoltmeters gemessen werden kann, ist dann:

(10) $$E_2 = \frac{I}{\omega C} = \frac{E_0}{\omega C R} = E_0 \frac{\omega L}{R} = E_0 \frac{\pi}{\vartheta} \quad \text{da}$$

(11) $$\vartheta = \frac{R}{2\,fL} = \frac{\pi R}{\omega L} \quad \text{ist.}$$

Bei Kenntnis von ϑ läßt sich daher die induzierte EMK E_0 aus der bei der Ermittlung des Übertragungsverhältnisses gemessenen Resonanzspannung berechnen.

(12) $$E_0 = E_2 \frac{\vartheta}{\pi}$$

Das logarithmische Dekrement ϑ läßt sich mit Hilfe der Halbwertsbreiten-Methode bestimmen:

Der Schwingungskreis wird auf Resonanz abgestimmt, die Resonanzkapazität C_r und die Resonanzspannung bestimmt. Dann wird auf beiden Flanken der Resonanzkurve auf halbe Resonanzspannung eingestellt und die dabei auftretende Kapazitätsdifferenz bestimmt.

$$(C_r + C_1) - (C_r - C_2) = C_1 + C_2 = \Delta c.$$

Dann ist

(13) $$\vartheta = \frac{\pi \Delta c}{\sqrt{3}\, C_r}$$

Da bei dieser Methode der Dämpfungsbestimmung ein geeichter Normalkondensator zur Messung von Δc dem Rahmenkreis parallel geschaltet werden muß, verringert sich ϑ durch die geringen Verluste dieses Kondensators. Um diesen Fehler und jegliches Umschalten des Gerätes zu vermeiden, wurde noch folgendes andere Verfahren durchgeführt:

Die Resonanzspannung des Rahmenkreises wird gemessen und durch Parallelschalten eines veränderlichen Widerstandes, der zu Zwecken, die unten noch erörtert werden, an dieser Stelle schon im Gerät vorhanden ist, auf die Hälfte reduziert. Dann ist der parallelgeschaltete Widerstand R_D gleich dem Resonanzwiderstand $\Re$ des Rahmenkreises: $R_D = \Re$

(14) Es ist aber: $$\Re = \frac{L}{CR}$$ Nach (11) ist dann:

(15) $$\vartheta = \frac{\pi}{\omega C \Re}$$ und nach (10):

(16) $$E_0 = E_2 \frac{1}{\Re \omega C}$$

Es ist demnach nur noch die Abhängigkeit der Kapazität C von der Abstimmskala bzw. von der Frequenz ω zu bestimmen, was jedoch bei der Bestimmung von ϑ nach (13) ebenfalls notwendig wäre.

Bemerkenswert ist nun jedoch, daß bei der Abstimmung auf Resonanz nach Gleichung (9) kein Indikator vorhanden ist, der den maximalen Strom im Schwingungskreis anzeigt, sondern es wird in der Praxis auf das Maximum der Spannung am Kondensator E_2 abgestimmt, weil man diese Spannung mit einem Röhrenvoltmeter leicht bestimmen kann.

$$E_2 = \frac{I}{\omega C} = \frac{E_0}{\omega C \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{E_0}{C \sqrt{\omega^2 R^2 + \omega^4 L^2 - 2\omega^2 \frac{L}{C} + \frac{1}{C^2}}} \tag{17}$$

Für diesen Fall gilt nun eine andere Resonanzgleichung, die dadurch bestimmt werden kann, daß der Radikand der Wurzel im Nenner von (17) zum Minimum gemacht wird.

$$2\,\omega R^2 + 4\,\omega^2 L^2 - 4\,\omega \frac{L}{C} = 0 \tag{18}$$

Die Resonanzgleichung für den Fall der maximalen Kondensatorspannung lautet dann also:

$$\omega^2{}_v = \frac{1}{LC} - \frac{R^2}{2L^2} \tag{19}$$

Durch Einsetzen von (19) in (17) kann die Abweichung der Kondensatorspannung bei dieser neuen Resonanz E_2^v von der bei gewöhnlicher Stromresonanz errechnet werden. Nach Umrechnung ist dann:

$$E_2^v = E_2 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{R^2 C}{4L}}}$$

Setzt man die praktisch gemessenen Werte von R, C und L in diese Gleichung ein, so findet man, daß die Abweichung im ungünstigsten Falle geringer als 1 ‰ ist. Es kann also ohne Einschränkung stets mit der Formel (9) anstatt der richtigen (19) in der Praxis gerechnet werden.

Der Dämpfungswiderstand.

Soll bei der Feldstärkenmessung dieselbe Resonanzspannung E_2 am Empfangsrahmen erzeugt werden, die durch den fernen zu messenden Sender hervorgerufen wurde, so ist es nicht möglich, den Hilfssenderstrom so klein zu machen, bis dies der Fall ist, weil dieser Strom dann unterhalb der Meßgrenze liegen würde. (Der kleinste mit Hilfe von Thermoelementen meßbare Hochfrequenzstrom ist ca.

0,1 mA.) Deshalb wird der Sendestrom auf 0,1 bis 0,5 mA eingestellt und ein veränderlicher Widerstand solange verkleinert, bis wieder die vom fernen Sender bewirkte Spannung vorhanden ist und dann die Größe des Widerstandes bestimmt.

Da ein mechanischer Widerstand seines Skineffektes und seiner Kontaktfehler wegen unbrauchbar ist, wird an dieser Stelle eine Gleichrichterröhre verwendet, deren innerer Widerstand verändert werden kann. Um zu vermeiden, daß der Empfangsrahmen außer dem magnetischen das elektrische Feld eines Senders mit aufnimmt, ist die Eingangsanordnung im Gegentakt gebaut und genau symmetriert, so daß nur die magnetische Induktion wirksam ist. Aus diesem Grunde muß die Widerstandsröhre, auch Dämpfungsröhre genannt, ebenfalls als Gegentaktröhre geschaltet sein (vgl. Abb. 1).

Es wurden die Röhrenkennlinien der Dämpfungsröhre mit dem Heizstrom als Parameter aufgenommen. Dabei wurde festgestellt, daß bei einer festen Anodenspannung von 5 Volt allein durch Veränderung des Heizstromes eine Widerstandsänderung von 2 MΩ bis 200 Ω möglich ist. Die Verwendung einer solchen niedrigen Anodenspannung ist deshalb wichtig, weil dadurch eine Jonisation der Gasreste in der Röhre, die zu Fehlmessungen Anlaß geben würden, vermieden wird. Zur Verwendung bei Feldstärkenmessungen eignet sich besonders die Kurve in Abb. 10, die die Abhängigkeit des inneren

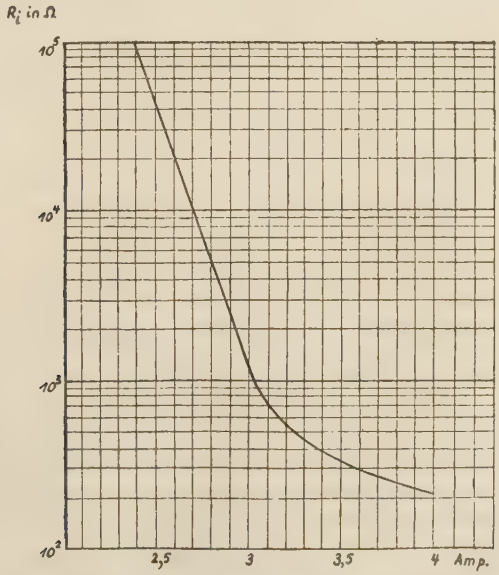

Abb. 10. Abhängigkeit des Dämpfungswiderstandes vom Heizstrom. ($e_A = 5$ Volt)

Röhrenwiderstandes R_i vom Heizstrom i_H angibt. Gegebenenfalls kann auch R_i stets aus der durch eine Anodenspannungsänderung hervorgerufenen Anodenstromänderung bestimmt werden: Es ist:

$$R_i = \frac{\Delta e_A}{\Delta i_A} \tag{21}$$

Da bei der Widerstandsbestimmung mit Gleichstrom beide Gleichrichterwege parallel, bei der Belastung des Schwingkreises jedoch in Reihe liegen, ist der wirksame Widerstand R_D gleich 4 R_i.

$$R_D = 4\,R_i. \tag{22}$$

Um festzustellen, ob die Größe der Spannung E_2, die an einem Teil der Kennlinie steuert, schon in dem in Betracht kommenden Gebiet von E_2 (0,05 bis 0,5 Volt) eine meßbare Veränderung des Belastungswiderstandes bewirkt, wurde bei verschiedenen E_2 (durch Verändern des Hilfssenderstromes) und konstantem Heizstrom der Dämpfungsröhre das Verhältnis der verminderten zur vollen Resonanzspannung bestimmt. Es wurde gefunden, daß die Abhängigkeit des Dämpfungswiderstandes von der Rahmenspannung, d. h. vom Strom im Sender, nicht meßbar, der auftretende Fehler also kleiner als ein Ablesefehler am Röhrenvoltmeter ist . Aus diesem Grunde kann das Dämpfungsverhältnis sehr einfach in Prozenten ausgedrückt werden. Es wurde ferner die Abhängigkeit der prozentualen Dämpfung vom Widerstand R_i mit λ als Parameter gemessen (s. Abb. 11), wobei sich zeigte, daß nur eine geringe Frequenzabhängig-

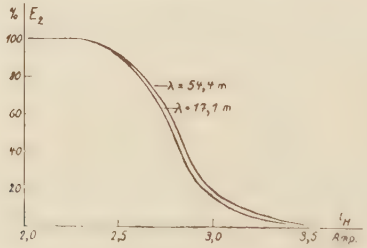

Abb. 11. Schwächung von E_2 mittels Dämpfungsröhre.
(RGN 2002 $e_A = 5$ Volt)

keit vorhanden ist. Diese Eigenart erklärt sich daraus, daß der Resonanzwiderstand nur sehr wenig von der Frequenz abhängig ist, weil bei hohen Frequenzen die Verluste durch den großen Skineffekt im R und bei niedrigen Frequenzen durch den größeren Kondensator (s. Formel für den Resonanzwiderstand $\Re = \frac{L}{RC}$) sich ungefähr ausgleichen.

Änderungen an der Apparatur.

Das benutzte Meßgerät war ein Überlagerungsempfänger, an dem bemerkenswert war, daß der Oszillator nur durch die Leitungsführung mit dem Eingangsmodulator gekoppelt war, und daß die beim Messen eines Senders störende Modulation desselben dadurch beseitigt wurde, daß die Zwischenfrequenz noch einmal zu einer Tonfrequenz überlagert wurde. Durch Verändern dieser Tonfrequenz am zweiten Überlagerer oder an den Abstimmungen trat jedoch wegen der Frequenzkurve des Niederfrequenzverstärkers eine Änderung des Verstärkungsfaktors des Gerätes ein. Um diese Mängel des Gerätes zu vermeiden, wurde der Bau eines neuen Apparates, der eine Reihe von Verbesserungen aufweist, vorgeschlagen und auch im Laufe einer Studienarbeit von Herrn Guiseppe Gramaglia, Turin, im Heinrich-Hertz-Institut ausgeführt. (Schaltung dieses Gerätes in Abb. 12.) Durch Verwendung von Hexoden (RENS 1234) in der Eingangs-Gegentaktstufe II und III und in den beiden Zwischenfrequenzstufen V und VI konnte die Verstärkung dieses neuen Gerätes so hoch getrieben werden, daß selbst bei einer Rahmenspannung von 10 μV am Ausgangsinstrument ein großer Ausschlag auftritt, ohne daß das Gerät Schwingneigung zeigt. Die von einer REN 904 (IV) erzeugte Oszillatorspannung wird direkt den dritten Gittern der beiden Eingangshexoden zugeführt, wodurch eine eindeutige und stabile Überlagerung der Empfangsfrequenz erreicht wird. Um unabhängig von der Modulation der zu messenden Station zu sein, wird der durch die Zwischenfrequenzspannung hervorgerufene Richtstrom einer Diodenstrecke nach Gleichstromverstärkung durch eine Röhre (VII) gemessen. Zum Abhören ist ein besonderes Audion (VIII) eingebaut, das vor der Diode an den Zwischenfrequenzverstärker angekoppelt ist. Der Richtstrom der Diodenstrecke wird der Gleichstrom-Verstärker-Röhre über zwei Widerstand-Kondensator-Anordnungen mit verschiedenen Zeitkonstanten zugeführt, von denen die eine abschaltbar ist. Dadurch wird erreicht, daß Telephoniesender mit kleiner und Telegraphiesender mit großer Zeitkonstante gemessen werden können. Bei den meisten Telegraphiesendern setzt die Trägerfrequenz aus, wenn kein Zeichen gegeben wird. Bei einer integralen Meßmethode würde also die registrierte Feldstärke mit der Zeichenlänge und -häufigkeit variieren. Es interessiert aber nur die Höhe der einzelnen Zeichen, denn nur diese ist ein Maß für die Feldstärke. Aus diesem Grunde wird über eine Anordnung gemessen, die einen Kondensator durch das Zeichen schnell auf ein bestimmtes, von der Intensität desselben abhängiges Potential aufladen, aber nur langsam wieder entladen läßt, so daß der Kondensator bis zum Eintreffen des nächsten Zeichens sein Potential nahezu beibehält. Dann wird am Registrierinstrument, das im Anodenkreis einer Röhre liegt, die durch das Potential des Kondensators gesteuert wird, nur die Amplitude

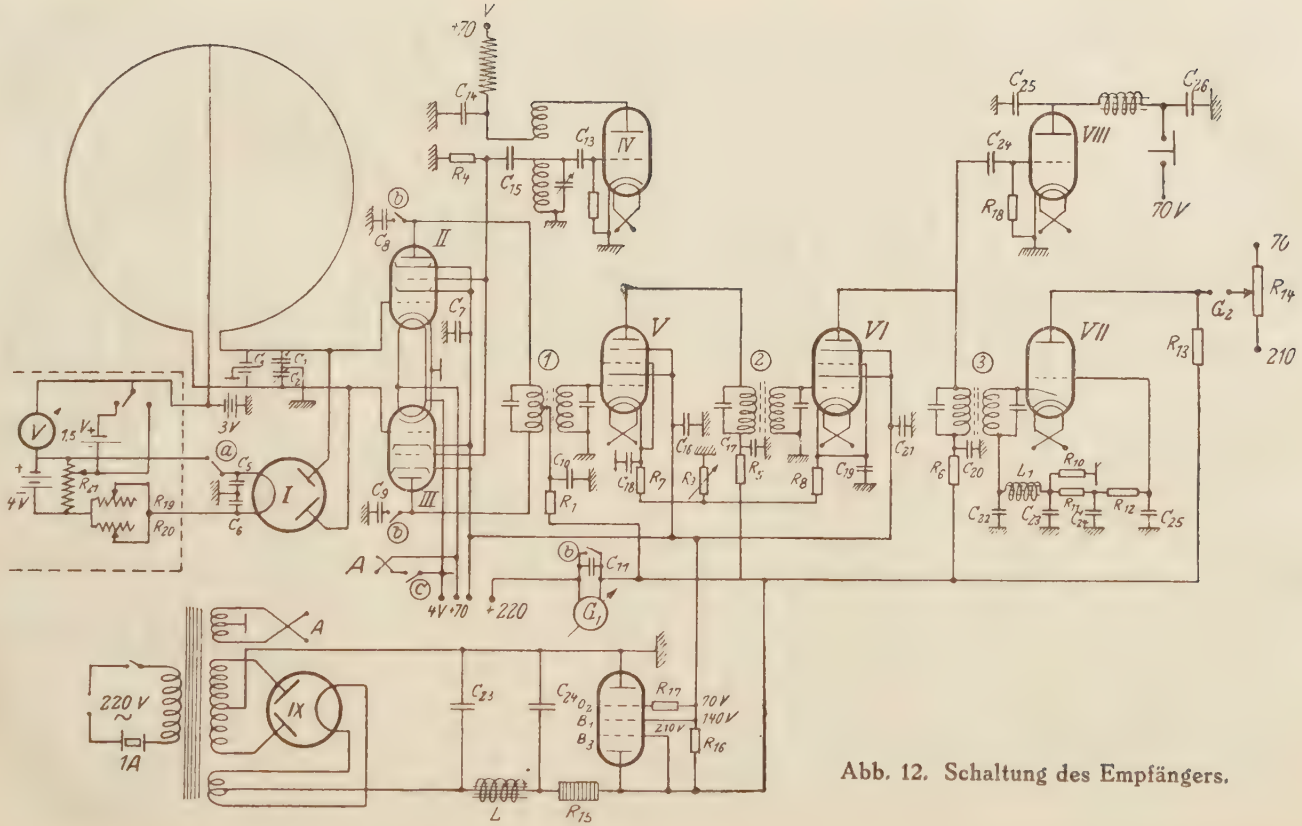

Abb. 12. Schaltung des Empfängers.

der Zeichen und damit die Feldstärke gemessen. Da bei Telephoniesendern die Modulation keine Änderung des Richtstromes bewirkt und die Trägerfrequenz stets vorhanden ist, kann die Anordnung mit der großen Zeitkonstante (ca. 1 Sek.) bei Messung von Telephoniesendern abgeschaltet werden und mit kleinerer Zeitkonstante (ca. $^1/_{20}$ Sek.) gemessen werden, wodurch die Meßanordnung gegenüber Feldstärkeschwankungen empfindlicher wird. Das Gerät wird im normalen Betrieb aus dem Wechselstromnetz gespeist, wobei die Anoden- und Schirmgitterspannungen stabilisiert werden, jedoch werden beim Umschalten der ersten Röhren auf Richtverstärker-Voltmeter diese zur Erhöhung der Stabilität und Meßgenauigkeit aus Batterien betrieben.

Im folgenden soll nun die Eichung einer neuen Apparatur (z. B. einer solchen nach Abb. 12) zur Messung von Feldstärken beschrieben werden, wobei alle in den obigen Abschnitten gefundenen Gesetzmäßigkeiten, Zusammenhänge und Erfahrungen benutzt werden, daß daraus ein Meßverfahren resultiert, bei dem die Feldstärke nur aus Messungen unter Vermeidung jeglicher Berechnungen von bestimmenden Größen (mit Ausnahme der effektiven Antennenhöhen-Bestimmung) ermittelt wird. Schließlich soll die mit einer solchen geeichten Apparatur auszuführende Feldstärkenmessung selbst erläutert werden.

Eichung der Apparatur.

1. Aus der Windungszahl und Rahmenfläche wird für jedes ω die effektive Antennenhöhe nach (2) berechnet (s. Abb. 13).

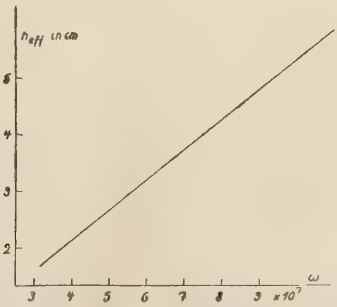

Abb. 13. Abhängigkeit zwischen h_{eff} und ω.

2. Wellenlängeneichung der Abstimmskala durch Abstimmen auf den Meßsender und Bestimmung der Wellenlänge mit einem Wellenmesser (s. Abb. 14).

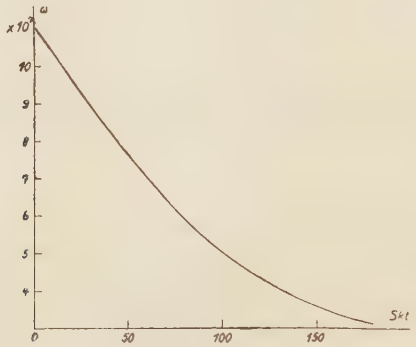

Abb. 14. Eichkurve des Rahmenkreises.

3. Bestimmung der Kapazität des Rahmenkreises in Abhängigkeit von der Abstimmskala, durch Zuschalten der Anordnung ohne Rahmen zu einem Resonanzkreis mit geeichtem Normalkondensator und Bestimmung der jeweiligen Kapazitätsverschiebung (s. Abb. 15).

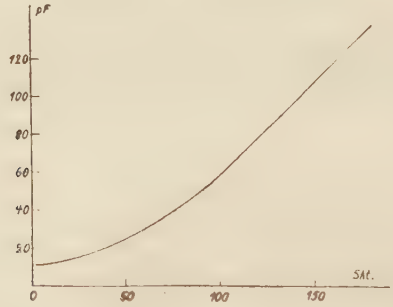

Abb. 15. Kapazität des Eingangskreises in Abhängigkeit von der Einstellskala.

4. Eichung des Röhrenvoltmeters mit 50periodischem Wechselstrom nach Abb. 1 oder mit Hochfrequenz nach der Spitzenspannungsmethode nach Abb. 5 (s. Abb. 16).

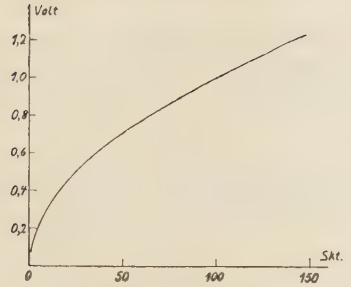

Abb. 16. Eichkurve des Röhrenvoltmeters.

5. Bestimmung des Dämpfungswiderstandes R_D in Abhängigkeit vom Heizstrom i_H der Dämpfungsröhre unter Berücksichtigung der Gleichung $R_D = 4\,R_i$ (s. Abb. 10).

6. Bestimmung des Resonanzwiderstandes $\Re$ in Abhängigkeit von λ durch Verändern des Dämpfungswiderstandes R_D, bis die vom Hilfssender erzeugte Kondensatorspannung E_2 auf die Hälfte zusammengebrochen ist. Dann ist

$$\Re = R_D \quad \text{(Abb. 17).}$$

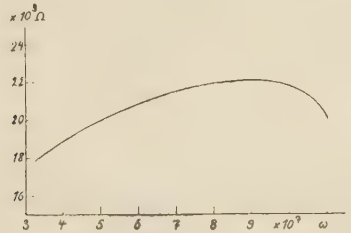

Abb. 17. Abhängigkeit des Resonanzwiderstandes $\Re$ von ω.

Es ist zu empfehlen, das Übertragungsverhältnis zwischen Strom im Sender und Spannung E_2 am Empfangsrahmen

(23) $$\ddot{U} = \frac{E_2}{I_s}$$

in Volt pro Ampere bei jeder Feldstärkenmessung selbst zu bestimmen, da es sich bei jeder gegenseitigen räumlichen Veränderung von Empfangs- und Senderahmen verändert.

Ausführung einer Feldstärkenmessung.

Die Ausführung einer Feldstärkenmessung oder die Eichung des Ausgangs-Indikator-Instrumentes, das in der Regel ein Schreib-Instrument ist, für eine bestimmte Wellenlänge erfolgt nach Eichung der Apparatur in einfacher Weise:

1. Nach Ablesen der Abstimmskala ergeben sich aus den Eichkurven 13, 14, 15, 17 sofort die Größen:

$$h_{eff},\ \omega,\ C \text{ und } \mathfrak{R}.$$

2. Ablesen des vom fernen Sender am Ausgangsinstrument erzeugten Ausschlages A.

3. Der Eingangskreis wird dann sehr wenig verstimmt, so daß der ferne Sender bei der folgenden Substitution nicht mehr stört.

4. Mit Hilfe des auf den Empfangsrahmen abgestimmten Hilfssenders und dem Dämpfungswiderstand R_D wird am Ausgangsinstrument wieder auf den Ausschlag A eingestellt. Der dabei auftretende Senderrahmenstrom i_{s_1} wird mit Hilfe eines im Sender eingebauten Thermoelementes, R_D aus der Kurve Abb. 10, bestimmt.

5. Zur Bestimmung des Übertragungsverhältnisses wird die Empfängereingangsstufe auf Röhrenvoltmeter umgeschaltet, R_D durch Ausschalten der Dämpfungsröhre unendlich groß gemacht und bei großem Sender-Rahmenstrom i_{s_2} (ca. 200 mA) die Spannung E_{22} am Empfangsrahmen bestimmt.

(24) $$\ddot{U} = \frac{E_{22}}{i_{s_2}}$$

Da, wie oben festgestellt, das Übertragungsverhältnis linear mit i_s geht, ist also ohne Berücksichtigung der Dämpfungsröhre:

(25) $$E_{21} = i_{s_1} \cdot \ddot{U}.$$

Durch Parallelschalten des Dämpfungswiderstandes bricht diese Spannung auf E_{20} zusammen:

(26) $$E_{20} = E_{21} \frac{R_D}{\mathfrak{R} + R_D}$$

Diese Spannung E_{20} wird also ebenfalls vom fernen Sender am Rahmenkreis erzeugt. Nach Gleichung (16) ist dann die induzierte EMK E_0:

(16) $$E_0 = E_{20} \frac{1}{\mathfrak{R}\omega C} = E_{21} \frac{R_D}{(\mathfrak{R} + R_D)\,\omega C \cdot \mathfrak{R}}$$ nach (21).

Nach Einsetzen von (25) u. (24) ist dann die Feldstärke des fernen Senders:

$$(27) \qquad H = \frac{R_D \, i_{s_1} \, E_{2\,2}}{h_{eff} \cdot (\Re + R_D) \cdot \omega C \, i_{s_2} \cdot \Re}$$

Beim Messen größerer Feldstärken (ca. 100 μV/m und darüber) ist es nicht nötig, zur Bestimmung des Übertragungsverhältnisses die Dämpfungsröhre abzuschalten, vielmehr kann das Übertragungsverhältnis gleich einschließlich der Dämpfungsröhre bestimmt werden. Bei Anwendung dieser Methode fehlt der in (26) vorhandene Dämpfungsfaktor in der Schlußgleichung und diese lautet dann:

$$(28) \qquad H = \frac{i_{s_1} \cdot E_{2\,2}}{h_{eff} \cdot i_{s_2} \, \omega C \, \Re}$$

Empfindlichkeit und Genauigkeit des Meßverfahrens.

Auf der V. Generalversammlung der Union Radio-Scientifique Internationale im Juni 1934 wurde die Forderung nach einem Feldstärkemeßgerät aufgestellt, mit dem die Bestimmung von 1 μV/m mit 20 % Genauigkeit möglich sei. Wie unten gezeigt wird, erreicht das hier beschriebene Verfahren bezüglich der Empfindlichkeit diese Forderung eben, während die Meßgenauigkeit sogar größer als gefordert ist.

Betrachtet man zunächst die Endformel (27), so läßt sich bezüglich der Meßgenauigkeit feststellen, daß i_{s_1} und i_{s_2} erfahrungsgemäß mit maximal 2 bis 3 %, E_{22} bei 0,5 Volt mit 1 %, bei 0,2 Volt mit ca. 5 % und die anderen Größen mit ungefähr 1 % Fehler behaftet sind. Bei einer Kreisfrequenz von $\omega = 10^8$, $R_D = 200\ \Omega$, $i_{s_1} = 0{,}1$ mA, $i_{s_2} = 200$ mA und einem E_{22} von 0,5 Volt errechnet sich aus (27) eine Feldstärke von ca. 3 μV/m mit 3 bis 5 %iger Genauigkeit. Wird das Übertragungsverhältnis so verändert, daß E_{22} nur 0,2 Volt beträgt, dann ist die Feldstärke von 1 μV/m noch meßbar, und zwar mit einem Fehler von $\pm$ 10 %.

Das behandelte Feldstärkemeßverfahren erreicht also die im Hinblick auf den heutigen Stand der Hochfrequenztechnik geforderten Grenzen. Es hat aber weiter gegenüber anderen Verfahren den Vorzug, daß es noch weiter ausbaufähig ist. Die Meßgenauigkeit läßt sich erhöhen, wenn es möglich ist, bei der Bestimmung des Übertragungsverhältnisses i_{s_2} ca. 0,5 bis 1,0 Amp. groß zu machen. Damit läßt sich ebenfalls die Meßgrenze nach den noch kleineren Feldstärken hin verschieben, wobei es jedoch noch zweckmäßig sein dürfte, in dem Meßempfänger eine weitere Zwischenfrequenzstufe einzubauen.

Zusammenfassung.

Es wurde zuerst das bisherige Feldstärkemeßverfahren mit Hilfssender nach Leithäuser beschrieben und auf die bei der Rechnung eintretenden Fehlermöglichkeiten hingewiesen. Dann wurde über die experimentellen Untersuchungen der Meßgrößen, insbesondere der Dämpfung, des Dämpfungswiderstandes und des Übertragungsverhältnisses berichtet. Beim letzteren wurden die im Freien gemessenen Werte mit den aus einer Berechnung hervorgehenden verglichen und eine für den Kurzwellenbereich gute Übereinstimmung gefunden. Es wurden die durch die experimentellen Untersuchungen als notwendig erachteten Abänderungen an der Meßapparatur beschrieben und ein neues Meßverfahren angegeben, bei dem alle in das Ergebnis eingehenden Größen gemessen werden können. Für größere Feldstärken über 100 μV/m konnte dieses Meßverfahren noch wesentlich vereinfacht werden.

Das angegebene Feldstärkemeßverfahren erreichte die auf der V. Generalversammlung der Union Radio Scientifique Internationale geforderte Empfindlichkeit von 1 μV/m, übertrifft die geforderte Genauigkeit von 20 % wesentlich und hat den Vorteil, durch Vergrößerung des Hilfssenders nach beiden Richtungen noch erheblich ausbaufähig zu sein.

Lebenslauf.

Am 24. Juni 1910 wurde ich, Gerhard Helmut Otto Schweitzer, evangelischen Bekenntnisses und arischer Abstammung, in Berlin als Sohn des Elektroinstallateurs Wilhelm Schweitzer geboren. Ich bin deutscher Staatsangehöriger.

Vom Herbst 1916 bis 1923 besuchte ich die Volksschule in Berlin, vom Herbst 1923 bis Ostern 1927 die Kaempf-Real-Schule zu Berlin, und von Ostern 1927 ab die 6. Oberrealschule zu Berlin, die ich mit bestandener Reifeprüfung Ostern 1930 verließ, um Mathematik, Physik und Chemie zu studieren.

Während meines ganzen Studiums studierte ich an der Friedrich-Wilhelms-Universität Berlin. Seit Mai 1933 arbeite ich im Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung auf dem Gebiete der Hochfrequenz und im besonderen an der vorliegenden Dissertation und war gleichzeitig Assistent bei Prof. Dr. Leithäuser.

Meinen Lehrern während der Studienzeit spreche ich meinen herzlichsten Dank aus. Dieser gilt in besonderem Maße Herrn Prof. Leithäuser, dem ich die Anregung und weitgehende Förderung der vorliegenden Arbeit verdanke. Er gilt aber auch den Professoren: Bieberbach, Czerny, Feigl, Hettner, von Laue, Nernst, Schlenk, Erh. Schmidt und Wehnelt.

Ferner danke ich auch dem Heinrich-Hertz-Institut für die Bereitstellung der Mittel zur Durchführung der Arbeit.